

В этих уравнениях  $\varphi_2 = a/r_2$ , где  $r_2$  – радиус центроиды (начальной окружности) второго колеса.

Дополнительно, для удобства применения метода профильных нормалей в системах координат на рис. 1, сместим кривую (4) на величину  $-0,25\pi t$  вдоль оси  $O_1 y_1$ . Тогда ось  $O_1 x_1$  будет проходить не через полюс, а через ось симметрии зуба.

В качестве примера построим боковые профили зубьев с односторонним (выпукло-вогнутым) и двусторонним (двойко выпукло-вогнутым) эволютным зацеплением по имеющемуся профилю инструментальной рейки.

Профиль рейки с односторонним зацеплением описывается уравнением [2]:

$$y_1 = 0,15383x_1 + 0,0431889x_1^2 + 0,0180714x_1^3 - 0,25\pi t. \quad (10)$$

Согласно зависимости (7), для нахождения тангенса угла между касательной к профилю и осью  $x$  продифференцируем уравнение, описывающее зубчатую рейку, и, подставив в (8), найдем величину ее перемещения относительно неподвижной системы координат. Далее вычисляем значения угла поворота нарезаемого колеса  $\varphi_2$  и определяем координаты точек профиля зуба в системе координат  $(x_2, y_2)$  по зависимостям (9).

На рис. 2 приведен полученный профиль боковой поверхности зуба модулем  $m = 1\text{мм}$  при радиусе начальной окружности  $r_2 = 100\text{мм}$ .

Профиль рейки с двусторонним зацеплением описывается уравнением

$$y_1 = 0,178105x_1 + 0,195597x_1^3 - 0,25\pi t. \quad (11)$$

Алгоритм построения профиля боковой поверхности зуба шестерни по имеющемуся профилю зубчатой рейки аналогичен описанному выше.

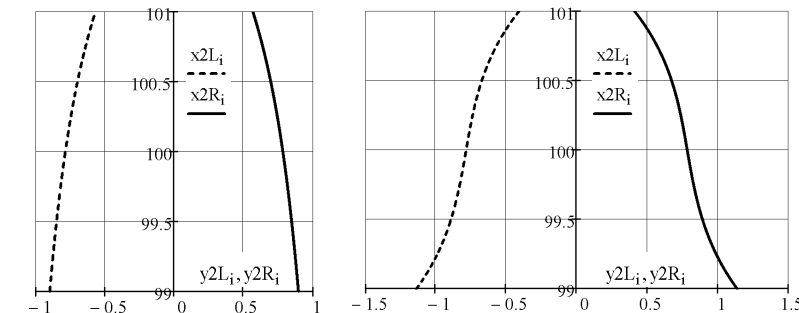


Рис. 2. Профили боковых поверхностей зуба при одностороннем зацеплении

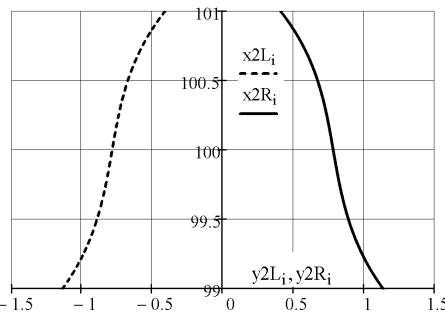


Рис. 3. Профили боковых поверхностей зуба при двустороннем зацеплении

На рис. 3 приведен профиль боковой поверхности зуба модулем  $m = 1\text{мм}$  при радиусе начальной окружности  $r_2 = 100\text{мм}$ .

## УДК 539.3

**Н.А. ТКАЧУК**, докт. техн. наук, зав.каф. ТММиСАПР,  
**А.Н. ТКАЧУК**, асп. каф. ДПМ НТУ «ХПИ»,  
**В.А. ЗАБОЛОТСКИХ**, рук. направления ООО "Ю БИ СИ МЕБЕЛЬ",

**А.А. КАПУСТИН**

## МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ЛИТЬЕМ

*У статті наведені підходи для розв'язання задачі моделювання фізико-механічних процесів при виготовленні деталей литтям. Описана математична модель досліджуваного процесу. Наведені числові та експериментальні результати дослідження напружено-деформованого стану прес-форм.*

*In the paper the approaches are presented for task's solution of modeling of physical and mechanical processes at manufacturing of details by casting. The mathematical model of the researching process is described. The numerical and experimental results of research of stressed and deformed state of press-forms are resulted.*

**Введение.** В статьях [1-6] сформулирована актуальная и важная задача разработки методов, моделей и алгоритмов для исследования физико-механических процессов при изготовлении деталей литьем. Эти процессы характеризуются следующими особенностями: сложной формой изготавливаемых деталей, а, следовательно, сложной формой полуматриц, в которых происходит формообразование деталей; сложной структурой технологической оснастки (пресс-формы (ПФ), литьевые формы), которые содержат, кроме собственно формирующих полуматриц, также и подкладные плиты, направляющие элементы, элементы охлаждения, газоудаления и т.д., которые находятся в условиях контактного термоупругого взаимодействия; сложным характером нагружения, граничных условий и условий сопряжения: давление подпрессовки, усилие запираания, сопряжение с элементами литьевой машины и т.д.; сложным процессом теплового и контактного взаимодействия расплава с полуматрицами, моделирование которого сопряжено с решением задачи о фазовых переходах, конвективной и контактной теплопередаче.

В работе [3] описана достаточно полная постановка задачи, сведение ее к вариационной, а также предложены общие пути решения. В силу того, что для различных случаев литья степень важности того или иного из перечисленных факторов различна, можно выделить отдельные частные подмодели, описывающие исследуемый физико-механический процесс с учетом его специфики. Решение таких частных задач весьма продуктивно с точки зрения качественного анализа результатов, поскольку количество значимых факторов в этом случае ограничено, а существующие объективно и выявляемые аналитически или численно взаимосвязи не затеняются множеством других. С другой стороны, существенно упрощается экспериментальная проверка адекватности, достоверности и точно-

сти используемых моделей, алгоритмов и результатов численного решения данных задач. В то же время при этом не происходит выхода из самой сути задач моделирования, которые представляют собой, по сути, те же связанные нелинейные задачи. Например, при исследовании пресс-форм для оснащения термопластавтоматов из всего множества перечисленных факторов наиболее существенными являются: нелинейный характер контактного термоупругого взаимодействия полуматриц и других элементов пресс-форм, подвергающихся действию усилий замыкания ПФ, внутреннего давления расплава в формирующей полости и усилий обжатия полуматриц. В данном случае в силу особенностей термопластических материалов (как правило, аморфное тело без резких фазовых переходов, обладающее невысокой температурой нагрева для формозаполнения в вязкотекучем состоянии) в первом приближении можно рассмотреть тестовую модель, учитывающую только механическое воздействие усилий записания ПФ, силовое воздействие элементов крепления и равномерное давление в формирующей полости при постоянной температуре. Пренебрегая инерционными эффектами, приходим к частному случаю контактной задачи эластостатики при совместном воздействии нескольких силовых факторов. В данной работе предложена конечно-элементная модель (КЭМ) для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов пресс-форм с учетом контактного взаимодействия, а также проведено сравнение полученных результатов с данными экспериментальных исследований.

**Метод решения задачи.** Рассматривается напряженно-деформированное состояние элементов типовой переналаживаемой пресс-формы. Расчетные схемы элементов пресс-форм строятся на основе анализа их взаимодействия (рис. 1). Варианты трех схем закрепления полуматрицы 1 на плите 3 со вставкой 4 показаны на рис. 2: вариант 1 соответствует свободному опиранию полуматрицы 1, зафиксированной обоймой 2, на подкладной плите 3; вариант 2 соответствует закреплению полуматрицы при помощи наклонных винтов, расположенных в обойме 2 (по два с каждой стороны) и создающих усилия прижима полуматрицы к плите и усилия ее обжатия  $T$ ; вариант 3 соответствует закреплению полуматрицы при помощи обоймы 2, выполненной в виде прижимных планок.

На полуматрицу со стороны подкладной плиты действует контактное давление, внутренняя ее часть находится под действием давления  $p$  рабочего тела. По плоскости  $z = \gamma_1$

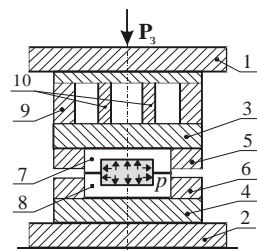


Рис. 1. Схема взаимодействия элементов пресс-формы:

1 – подвижная плита литейной машины; 2 – неподвижная плита литейной машины; 3 – подкладная плита; 4 – плита; 5, 6 – обойма; 7, 8 – полуматрицы; 9 – опоры; 10 – промежуточные опоры;  $P_3$  – усилие записания ПФ;  $p$  – давление расплава в формирующей полости

(рис. 3) исследуемая подматрица взаимодействует с полуматрицей 8, размещенной на неподвижной жесткой плите. Граничные условия на плоскости сопряжения полуматриц имеют вид:

$$u_z^1 + u_z^2 \leq 0, \quad (1)$$

где  $u_z^i$  – перемещения точек полуматриц (1-й и 2-й) в направлении оси  $z$ . Данное выражение определяет условие непроникновения полуматриц друг в друга. Такие же условия можно сформулировать для всех пар сопряженных тел. Множество этих ограничений задает область  $K$  в пространстве функций  $u$ .

Рассматривая частный случай общей постановки [3], на основе теории вариационных неравенств, получаем компоненты НДС элементов пресс-форм при отыскании минимума функционала:

$$u = \arg \min \left( \frac{1}{2} a(u, u) - b(u) \right); \quad (2)$$

$$a(u, u) = \int_{(\Omega)} \sigma_{ij}(u) \varepsilon_{ij}(u) d\Omega; \quad b(u) = \int_{(S)} f u dS. \quad (3)$$

Здесь  $\Omega = \bigcup_n \Omega_n$  – область пространства, занимаемая исследуемыми телами, а  $S = \bigcup_n S_n$  – об-

единенная поверхность этих областей.

Таким образом, для определения НДС элементов пресс-формы необходимо решить пространственную контактную задачу теории упругости. Для ее решения была использована методика, изложенная в работах [7-18] с использованием теории вариационных неравенств. Для дискретизации задачи использован метод конечных элементов с привлечением методов штрафа, множителей Лагранжа, модифицированного метода множителей Лагранжа для поиска решения на множестве  $K$ , задаваемом системой ограничений

типа (1) [19, 20]. Предложенный алгоритм реализован в виде комплекса программных модулей и использован при решении ряда задач об определении напряженно-деформированного состояния элементов ПФ [1]. Разработаны параметризованные КЭМ пресс-форм, а также специализированные программные модули, позволяющие управлять этими параметрами извне универсальных систем (например, ANSYS).

Анализ расчетных схем позволяет выделить следующие основные параметры, определяющие прочно-

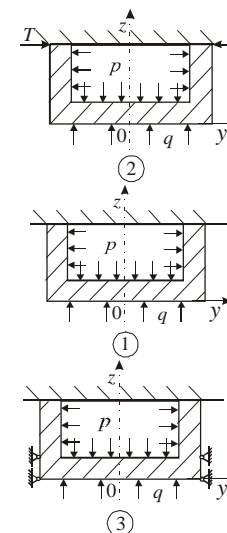


Рис. 2. Варианты расчетных схем полуматриц

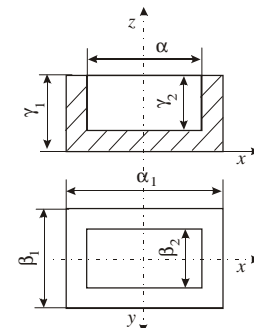


Рис. 3. Основные конструктивные параметры полуматриц

стные и жесткостные характеристики полуматриц пресс-форм: схема закрепления полуматрицы на подкладной плите; величина обжимающих усилий (схема 2 закрепления полуматрицы), величина усилия закрытия пресс-формы  $P_3$ , давление впрыска  $p$ , наличие, форма, длина и схема расположения промежуточных опор, а в качестве основных задач исследований – определение их влияния на НДС полуматриц и других элементов ПФ.

**Численное моделирование напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм.** Предложенные методы и алгоритмы для исследования НДС элементов пресс-форм реализованы в виде программно-

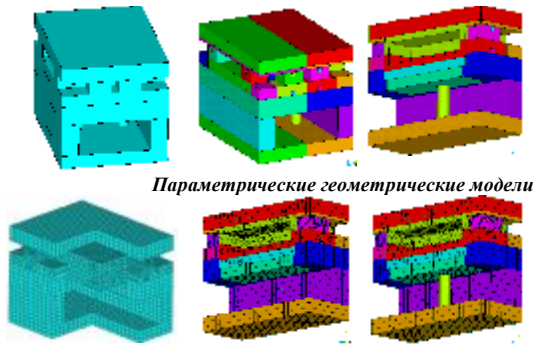


Рис.4. Этапы моделирования исследования элементов ПФ

модельного комплекса (ПМК), состоящего из специализированных модулей, управляющих параметрами конечно-элементной модели, созданной в среде ANSYS (см. выше). Общий вид параметрических геометрических и конечно-элементных моделей ПФ представлен на рис.4.

Данный комплекс является достаточно полноценной комплексной системой

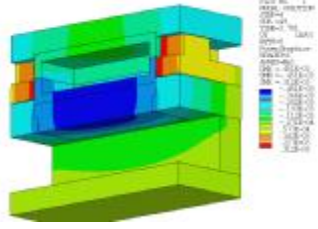
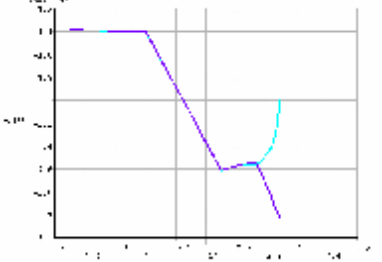
моделирования физико-механических процессов в пресс-формах. Для него *характерны*: реализация строгой математической постановки задачи на основе теории вариационных неравенств; соединение преимуществ специализированной и универсальных CAD/CAM/CAE-систем; использование параметрического подхода как основы для описания геометрии, свойств материалов элементов ПФ, силовых факторов и параметров численных моделей; расчетно-экспериментальное обоснование используемых количественных и качественных параметров численных моделей элементов ПФ [1]; полнофункциональность как с точки зрения полноты охвата конструктивных элементов, так и условий их контактного взаимодействия; комплексность подхода, который позволяет исследовать и силовое воздействие от литьевой машины, и давление рабочего материала в формирующих полостях, учитывать тепловое воздействие данного материала и системы охлаждения, а также другие факторы.

Разработанный ПМК является основой для создания комплексной системы автоматизированного проектирования, исследования и технологической подготовки производства, отличительными характеристиками которой являются: широкие возможности моделирования связанных физико-механических процессов и

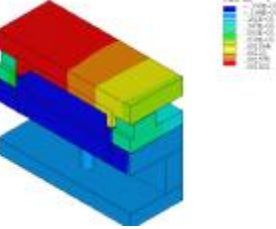
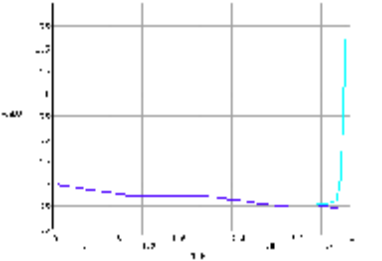
состояний; встроенная база данных и знаний; учет специфики конструкций, сортамента и свойств используемых материалов; учет технологического оборудования и оснастки предприятий отечественного машиностроения. В табл. 1 представлены иллюстрации отдельных этапов моделирования и исследования пресс-форм с использованием созданного ПМК.

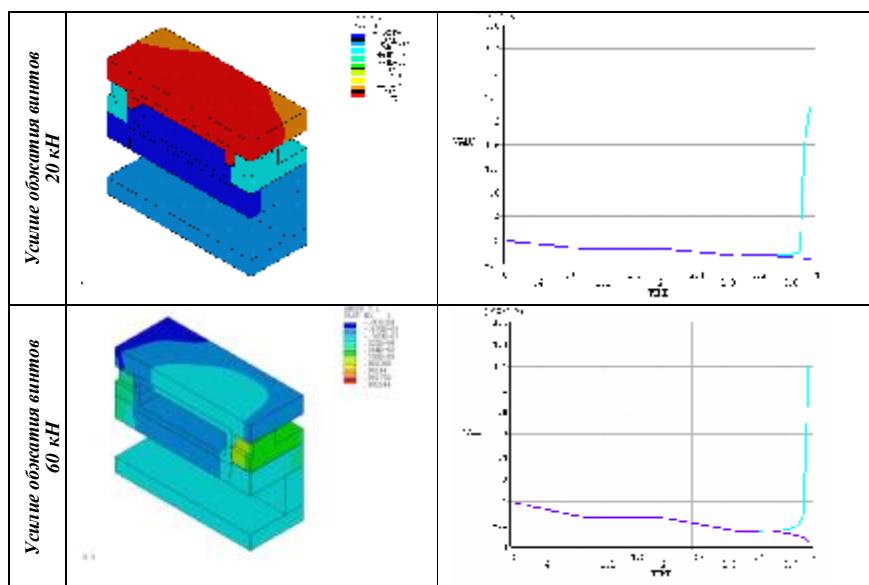
Таблица 1

Результаты исследования НДС пресс-форм в процессе нагружения усилиями закрытия пресс-формы, обжатия винтами и давления впрыска рабочего тела

Картинки распределения осевых перемещений		Зависимости перемещений точек в сопряжении полуматриц	
Базовый вариант			
	Картинки распределения осевых перемещений	Зависимости перемещений точек в сопряжении полуматриц	

Продолжение табл. 1

Опора $E \cdot 20 \times 10^{-3}$ м			
	Опора $E \cdot 20 \times 10^{-3}$ м		



**Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм методом электротензометрии и непосредственных измерений.** Целью данных исследований является определения адекватности, точности и сходимости разработанных методов, алгоритмов и моделей для определения НДС элементов пресс-форм с учетом контактного взаимодействия. Проведено сравнение полученных результатов с данными экспериментальных исследований [1, 21]. При разработке конструкций ПФ, в т.ч. переналаживаемых, необходимо знать прочностные и жесткостные характеристики наиболее ответственных деталей с целью обоснованного выбора их основных конструктивных параметров. Ранее численно получены значения напряжений и перемещений для наиболее нагруженных частей ПФ – подкладной плиты и полуматрицы, а также других элементов пресс-форм. Для экспериментального исследования НДС пресс-формы привлечен метод моделирования, что обусловлено следующими причинами: ПФ в натуральную величину имеет габариты 400x500x400 (мм), что не позволяет проводить испытания в лабораторных условиях; на имеющемся лабораторном оборудовании невозможно создать реальные усилия ее закрытия  $P_3 = 10$  МН и давление внутри полости матрицы  $F_n = 100$  МПа; использование модели, выполненной из материала натуре, позволяет производить исследование в более широких диапазонах нагрузок различных конструктивных вариантов ПФ в различных режимах. Поэтому было принято решение изготовить модель пресс-формы в масштабе 1:2, нагружать ее усилием закрытия  $P_3 = 1$  МН и

внутренним давлением  $F_n = 10$  МПа. Матрица модели в соответствии с натурной конструкцией выполнена составной из двух половин и по периметру плоскости разреза уплотняется резиновым кольцом. Давление в полости матрицы имитируется нагнетанием в нее масла от пневмогидропреобразователя.

Таким образом, при проведении экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния модели пресс-формы были соблюдены все необходимые условия масштабного физического моделирования, а также условия закрепления, нагружения и эксплуатации натурной конструкции крупногабаритной пресс-формы.

Моделируемую конструкцию в модели воспроизводят полностью или с изменениями, не влияющими на определяемые напряжения и перемещения. Модель по отношению к натуре выполняют с соблюдением масштабов геометрического и силового подобия [21, 22]:  $\alpha = l_n / l_m, \beta = P_n / P_m$ , где  $l_n, l_m$  – расстояние между подобными точками детали и модели,  $P_n, P_m$  – силы, приложенные в подобных местах детали и модели соответственно. Масштаб геометрического подобия модели  $\alpha$  выбирают с учетом сложности конфигурации исследуемой детали и ее размеров, величины нагрузки модели, применяемого метода измерений и имеющихся в наличии приборов измерения, требуемой точности, а также размера имеющегося для изготовления модели материала, времени и средств для испытаний. Масштаб силового подобия  $\beta$  выбирают из условия создания в модели достаточных для измерения деформаций, которые должны находится в упругой области в пределах пропорциональности и не вызывать пластичности.

В упругих моделях масштабы  $\alpha$  и  $\beta$  не сказываются прямым образом на погрешностях моделирования. Относительная погрешность определения напряжений и перемещений для натуре остается той же, что и погрешность, полученная при перемещениях на модели при применении тензометрии, и изменяется от 2% до 10% в наиболее неблагоприятном случае.

При моделировании составных деталей и узлов должны быть соблюдены условия подобия по упругости соединения, силам затяга и выбираемым зазорам. Существенное значение имеет воспроизведение на модели условий сопряжения составных частей конструкции, что требует применения соответствующих приемов экспериментирования и способов пересчета.

Устройства, передающие на модель нагрузку, должны обеспечивать отсутствие сил трения, которые могут приводить к изменению характера прикладываемых нагрузок и создавать дополнительные усилия. Условия моделирования должны быть выдержаны не только для тех частей, на которых проводятся измерения, но и для тех, которые влияют на распределение усилий и напряжений в исследуемых частях.

Условия подобия, по которым выполняют упругую модель и проводят переход от замеров на модели к искомым величинам для натуре, составляют из анализа размерностей или по общим функциональным зависимостям. Ес-

ли масштабы  $\alpha$  и  $\beta$  выбраны независимо друг от друга, то пересчет напряжений  $\sigma$ , линейных перемещений  $\Delta l$ , относительных деформаций  $\epsilon$  и усилий  $P$  с модели на натуру производят по приведенным ниже формулам:

$$\sigma_n = \frac{\beta}{\alpha^2} \sigma_m; \Delta l = \frac{E_m}{E_n} \frac{\beta}{\alpha} \Delta l_m; P_n = \beta P_m; \epsilon_n = \frac{E_m}{E_n} \frac{\beta}{\alpha^2} \epsilon_m. \quad (4)$$

Для данного случая моделирования пресс-формы из того же материала, что и натуре,  $E_m/E_n=1$ , масштабные коэффициенты  $\alpha=2$  и  $\beta=10$ . Тогда формулы пересчета (4) от модели к натуре принимают вид  $\sigma_n = 2,5 \sigma_m$ ;  $\Delta l = 5 \Delta l_m$ ;  $P_n = 10 P_m$ ;  $\epsilon_n = 2,5 \epsilon_m$ .



Рис. 5. Модель пресс-формы (а), ее элементы (б) и полуматрицы (в)



Рис. 6. Нагружение ПФ на столе пресса ПИ-125

Для определения НДС подкладной плиты и полуматрицы была изготовлена модель пресс-формы в масштабе 1:2 (рис. 5, 6). На рис. 7 представлен общий вид установки и измерительная аппаратура, а также размещение модели ПФ на столе пресса ПИ-125. Для определения деформаций подкладной плиты и полуматрицы на них были наклеены тензорезисторы типа КФ5Р5-5-100 с базой 5 мм (является составным, фиксирует деформацию во взаимоперпендикулярных направлениях и под углом  $45^\circ$  к осям). Тензорезисторы подключены к тензометрической системе СИИТ-3. В результате последовательного опроса тензорезисторов система СИИТ-3 выдает на печатающее устройство информацию о деформациях во всех исследуемых точках. Схема наклейки тензорезисторов на нижнюю поверхность подкладной плиты приведена на рис. 8. Там же укрупненно показана схема составного тензорезистора КФ-5Р5.

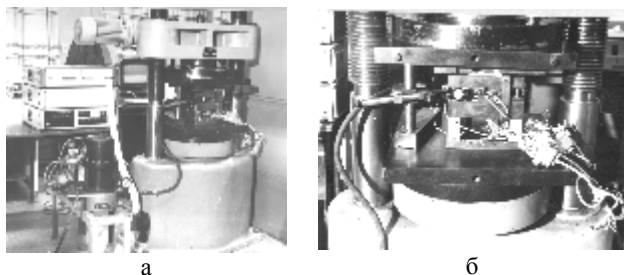


Рис. 7. Общий вид установки и измерительная аппаратура (а), а также размещение модели пресс-формы на столе пресса ПИ-125 (б)

Для раздельного замера перемещений поверхности подкладной плиты и дна полуматрицы были применены подпружиненные измерительные штифты, конструкция которых показана на рис. 9. В подкладной плите 1 выполнено сверление, куда вставлен измерительный штифт 2, прижимаемый пружиной 3 в верхнее положение. Индикатор 4 фиксирует перемещение нижней поверхности полуматрицы 5, а индикатор 6 фиксирует перемещение подкладной плиты. Разность перемещений, фиксируемых индикаторами 4 и 6, характеризует зазор между полуматрицей и подкладной плитой. На рис. 8 места установки измерительных штифтов обозначены Ш1-Ш3. Схема наклейки тензорезисторов ( $N_5 - N_8$ ) на полуматрицу показана на рис. 10. Испытания проводились на гидравлическом прессе ПИ-125 (см. рис. 7).

По значениям определенных в ходе экспериментальных исследований деформаций  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$  на нижней поверхности подкладной плиты по закону Гука определяются (при условии, что  $\sigma_z = 0$  на по-

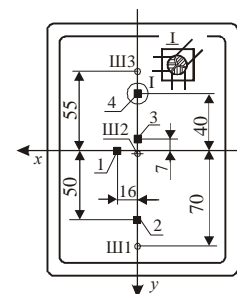


Рис. 8. Схема наклейки тензорезисторов и размещения измерительных штифтов в подкладной плите (1-4 – тензорезисторы, Ш1-Ш3 – измерительные штифты)

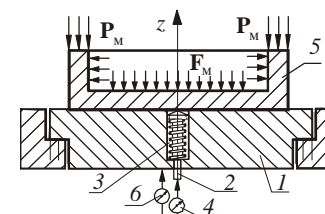


Рис. 9. Замер перемещений подкладной плиты и полуматрицы (верхности) напряжения по следующим формулам:

$$\sigma_x = \left( E / (1 - \nu^2) \right) (\epsilon_x + \nu \epsilon_y);$$

$$\sigma_y = \left( E / (1 - \nu^2) \right) (\epsilon_y + \nu \epsilon_x), \quad (5)$$

где  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости стали;  $\nu = 0,3$  – коэффициент Пуассона.

Результаты замера деформаций, значение величин напряжений на нижней по-

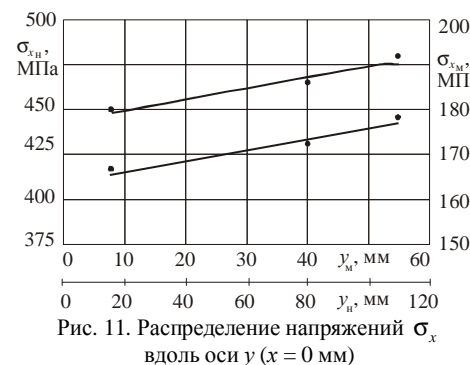


Рис. 11. Распределение напряжений  $\sigma_x$  вдоль оси  $y$  ( $x = 0$  мм)

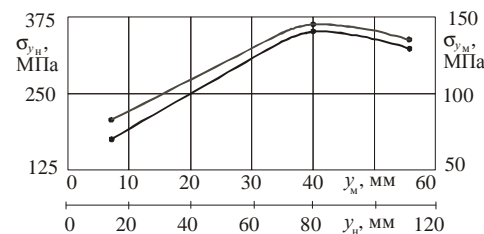


Рис. 12. Распределение напряжений  $\sigma_y$  вдоль оси  $y$  ( $x = 0$  мм)



верхности подкладной плиты приведены в табл. 2 (точки замера 1-4). По полученным результатам построены распределения осевых напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  на нижней поверхности подкладной плиты – рис. 11, 12. В связи с симметрией НДС относительно осей  $x$  и  $y$  графики напряжений и перемещений строятся для положительной области  $y > 0$ . Кривая показывает напряжение в плите при приложении усилия закрытия пресс-формы  $P_m = 1$  МН, кривая 2 – напряжения в подкладной плите при суммарном действии усилия закрытия и внутреннего давления жидкости  $F_m = 10$  МПа. Как видно из рис. 11, 12, основную долю напряженного состояния дает приложение к ПФ усилия записи, а создание внутреннего давления увеличивает напряжение на нижней поверхности подкладной плиты на 5-6%.

Таблица 2

Напряжения и деформации на нижней поверхности подкладной плиты при нулевом натяге ( $\delta = 0$ )

Точки замера	Координаты точек замера, мм			Деформации		Напряжения, МПа	
	$x$	$y$	$z$	$\epsilon_x \cdot 10^5$	$\epsilon_y \cdot 10^5$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1	16	0	-32,5	80	8	181,2	70,4
2	0	50	-32,5	63	40	178,0	132,0
3	0	-7	-32,5	72	12	168,0	72,0
4	0	-40	-32,5	64	44	172,0	140,0

При проведении замеров перемещений подкладной плиты и нижней полуматрицы с помощью измерительных штифтов выявлено, что они деформируются совместно. Также были произведены замеры нижней поверхности подкладной плиты при приложении усилия закрытия и внутреннего давления. Перемещения подкладной плиты в центре модели равны  $0,15 \pm 0,18$  мм, что соответствует  $0,75 \pm 1,0$  мм натуре, и несколько увеличиваются вдоль оси  $y$ .

При исследовании влияния величины размера промежуточных опор на перемещения нижней поверхности подкладной плиты с увеличением высоты (2 шт.) с 62,29 мм до 62,34 мм (натяг  $\delta = 0 + 0,05$ ) существенного изменения НДС подкладной плиты и полуматрицы не происходит.

При исследовании влияния усилия закрытия ПФ (см. точки 5-8, рис. 10) были получены следующие данные: напряжения в вертикальном направлении  $z$  для этих точек составили 162,0 МПа, а при приложении дополнительного внутреннего давления – 174,0 МПа. Прогибы боковой поверхности нижней полуматрицы в точках с координатами  $x = \pm 65$  мм,  $y = 0$  мм,  $z = 25$  мм (вдоль длинной стороны) составляют  $0,05 \pm 0,06$  мм при приложении соответственно усилия закрытия и внутреннего давления.

Таким образом, можно сделать вывод, что экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния модели подтвердили резуль-

таты численных расчетов, выполненные для натурной конструкции. Расхождение между ними не превышает 10% и обусловлено принятыми допущениями в расчетах. Максимальные осевые напряжения в подкладной плите не превышает 500 МПа, а максимальные перемещения составляют 1,25 мм при  $x = 0$  мм,  $y = \pm 770$  мм (в перерасчете на натурный объект). Напряженно-деформированное состояние зависит, в основном, от приложения усилия записи пресс-формы и незначительно (5-7%) увеличивается при создании внутреннего давления в матрице.

**Исследование напряженно-деформированного состояния блоков переналаживаемых пресс-форм методами голографической и спекл-интерферометрии.** Целью данного исследования является изучение напряженно-деформированного состояния блоков переналаживаемых пресс-форм для определения рациональных геометрических параметров и конструктивных решений, а также оценка точности и достоверности численных исследований. Приводятся результаты исследований НДС блоков пресс-форм при различных способах закрепления формирующей вставки и при установке дополнительных опор различной высоты.

Одним из важнейших этапов разработки конструкций и определения работоспособности пресс-форм является исследование НДС наиболее ответственных и нагруженных элементов: подкладных плит и полуматриц. Это вызвано тем, что данные детали воспринимают действие значительных по величине усилий закрытия пресс-форм и давление расплавленной пластмассы (рабочего тела), что приводит к их деформации и раскрытию стыков в полуматрицах. Последнее может послужить причиной брака. В настоящее время для высокоточных исследований геометрических изменений, происходящих с объектом при приложении возмущающих нагрузок (тепловых, механических, магнитных и т.д.) широкое применение нашли методы голографической и спекл-интерферометрии. Прежде всего это связано с тем, что обладая существенными преимуществами по сравнению с широко известными, они позволяют в короткий срок на этапах разработки, доводки, отработки технологических процессов изготовления, транспортировки, хранения получать высокоточную и интегральную информацию [23-25]. При этом для нахождения на-



Рис. 13. Рабочий момент записи интерферограмм непосредственно на столе пресса П-125

учно-обоснованных параметров и конструктивных решений блоков пресс-форм необходимо определить влияние *закрепления формирующей вставки* на величины возникающих перемещений и деформаций (закрепление винтами, свободное опирание); *дополнительных опор* на жесткость конструкции (опоры трех типоразмеров).

Для решения поставленных задач был применен метод, совмещающий голографическую интерферометрию во встречных пучках (голограммы Денисюка) и спекл-интерферометрию [24]. При проведении исследований прозрачную регистрирующую среду закрепляют

на исследуемом объекте с помощью специальных приспособлений. Этим достигается отстройка от регистрации паразитных смещений объекта как жесткого тела. Кроме того, при этом при расшифровке легко разделяются нормальная и тангенциальная компоненты вектора перемещений [23-25]. На рис. 13 представлен рабочий момент записи интерферограмм непосредственно на столе пресса П-125.

В табл. 3 приведены варианты сочетания конструктивных и эксплуатационных параметров при экспериментальном исследовании НДС пресс-форм.

В табл. 4 представлены интерферограммы, характеризующие деформированное состояние блока ПФ, а на рис. 14-16, 18, 21, 24, 25 (1 –  $z=60$  мм; 2 –  $z=10$  мм; 3 –  $z=-20$  мм; 4 –  $z=-60$  мм; 5 –  $z=-110$  мм), рис. 17, 19 (1 –  $z=60$  мм; 2 –  $z=30$  мм; 3 –  $z=10$  мм; 4 –  $z=-110$  мм); рис. 20, 23 (1 –  $z=60$  мм; 2 –  $z=30$  мм; 3 –  $z=-10$  мм; 4 –  $z=-110$  мм); рис. 18 (1 –  $z=60$  мм; 2 –  $z=15$  мм; 3 –  $z=-30$  мм; 4 –  $z=-110$  мм); рис. 26, 27 (1 –  $z=-25$  мм; 2 –  $z=-15$  мм; 3 –  $z=-5$  мм; 4 –  $z=5$  мм; 5 –  $z=25$  мм; 6 –  $z=35$  мм; 7 –  $z=55$  мм) – картины расшифровки некоторых интерферограмм.

Анализ поведения элементов пресс-формы при варьировании схем нагружения и сопряжения позволяет отметить следующие особенности. В целом деформированное состояние внешних поверхностей ПФ достаточно слабо зависит от наличия промежуточных опор и усилий закрепления полуматриц боковыми винтами. По плоскостям сопряжения элементов пресс-формы, в том числе полуматриц, наблюдаются разрывы перемещений, что

Таблица 3


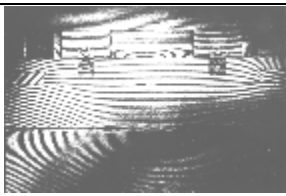
Варианты сочетания конструктивных и эксплуатационных параметров (\* для матрицы)

№ голограммы	Плоскость записи	Изменения в конструкции	Перепад нагрузки, кН	Внутр. давление, МПа
1	Oy	винты затянуты, опоры отсутствуют	250 ÷ 330	2,45
2	Oy	винты касаются, опоры отсутствуют	250 ÷ 330	2,45
3	Oy	винты не касаются, опоры отсутствуют	250 ÷ 330	2,45
4	Ox	винты не касаются, опоры отсутствуют	250 ÷ 330	2,45
5	Oy	винты затянуты, установлены две опоры 62,29мм	1000 ÷ 875	9,80
6	Ox	винты затянуты, установлены две опоры 62,29мм	1000 ÷ 875	9,80
7	Ox	опоры отсутствуют, винты затянуты	1000 ÷ 875	9,80
8	Oy	винты затянуты, опоры отсутствуют	1000 ÷ 875	9,80
9	Oy	винты затянуты, установлены две опоры 62,34 мм	1000 ÷ 875	9,80
10	Ox	винты затянуты, установлены две опоры 62,39 мм	1000 ÷ 875	9,80

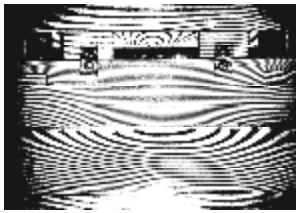

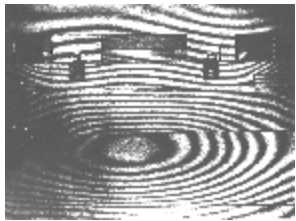

11	Oy	винты затянуты, установлены две опоры 62,39 мм	1000 ÷ 875	9,80
12	Ox	винты затянуты, установлены две опоры 62,39 мм	1000 ÷ 875	9,80
13*	Oy		50 ÷ 20	0
14*	Ox		50 ÷ 20	0

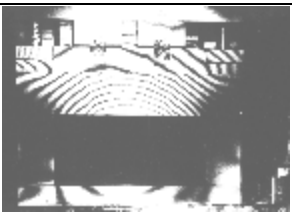

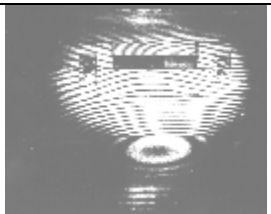
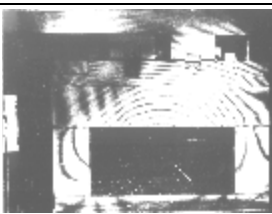
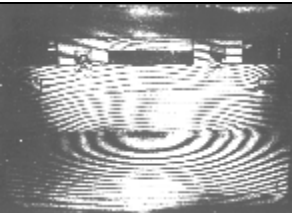
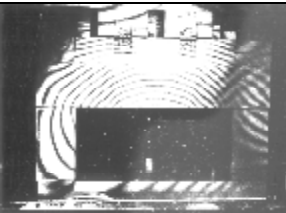
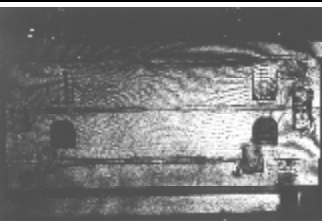

Таблица 4

Голографические интерферограммы матриц, характеризующие деформационные изменения при перепаде нагрузки гидравлического пресса (№ голограммы в табл.3)

Перепад нагрузки	P <sub>вн.</sub> , МПа	Интерферограмма	Перепад нагрузки	P <sub>вн.</sub> , МПа	Интерферограмма
1	2	3	4	5	6
250, 330	245		250, 330	245	
		1			2

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6
250, 330	245		250, 330	245	
		3			4
1000, 875	980		1000, 875	980	
		5			6

1000, 875	980		1000, 875	980	
1000, 875	980		1000, 875	980	
1000, 875	980		1000, 875	980	
Продолжение табл. 4					
1	2	3	4	5	6
50, 20	0		50, 20	0	

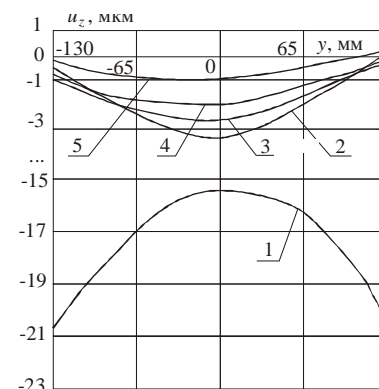


Рис.14. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 1 в табл.3)

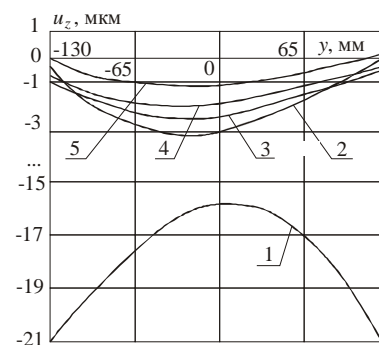


Рис.16. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 3 в табл.3)

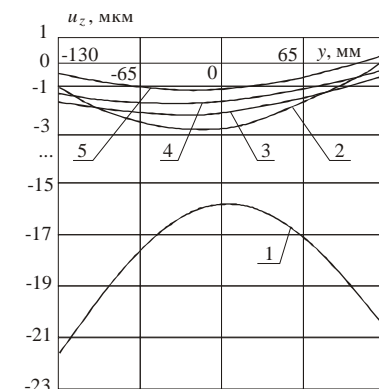


Рис.15. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 2 в табл. 3)

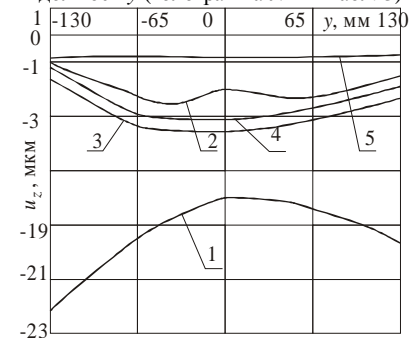


Рис.17. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 5 в табл.3)



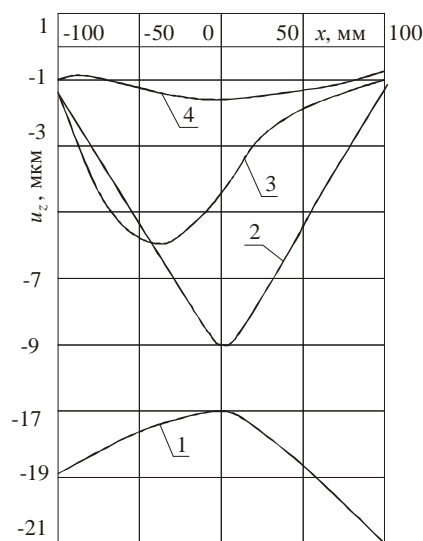


Рис.18. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $x$  (голограмма № 6 в табл.3)

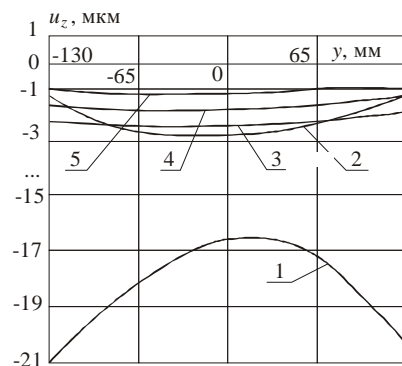


Рис. 21. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 8 в табл.3)

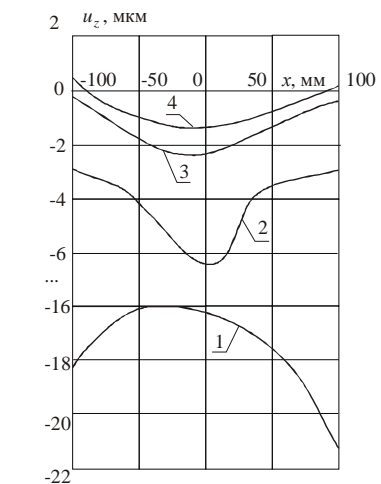


Рис.19. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 4 в табл.3)

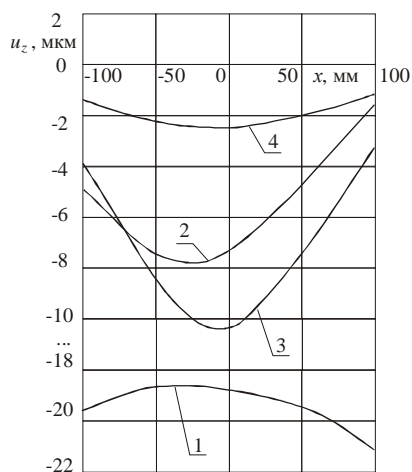


Рис.20. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности матрицы вдоль оси  $x$  (голограмма № 7 в табл.3)

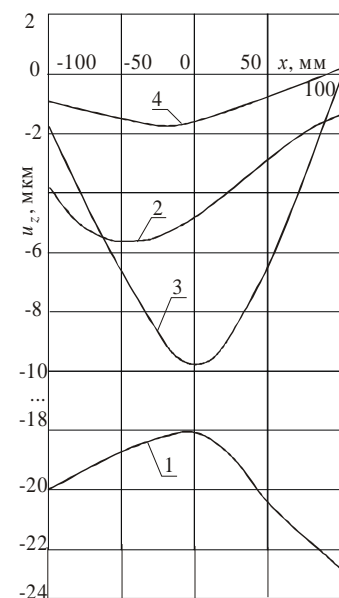


Рис.22. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $x$  (голограмма № 12 в табл.2)

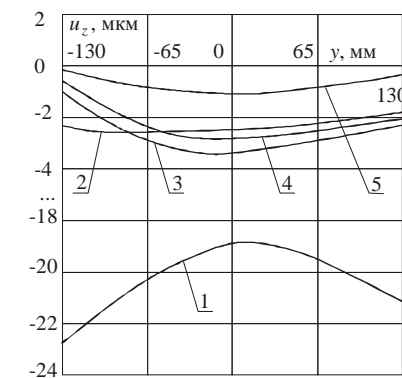


Рис.24. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 11 в табл. 3)

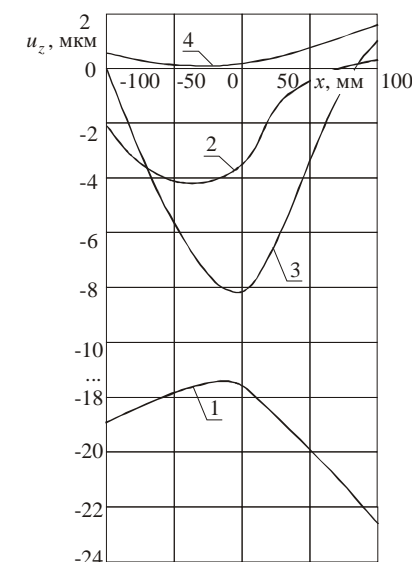


Рис.23. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $x$  (голограмма № 10 в табл. 3)

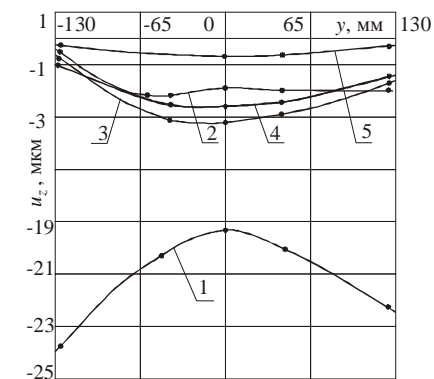


Рис.25. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 9 в табл.3)

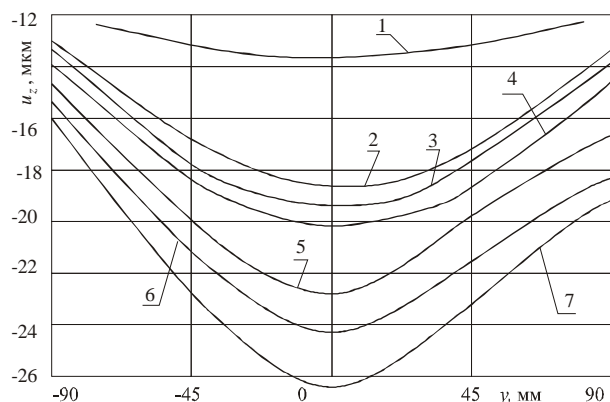


Рис. 26. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности матрицы вдоль оси  $y$  (голограмма № 13 в табл. 3):

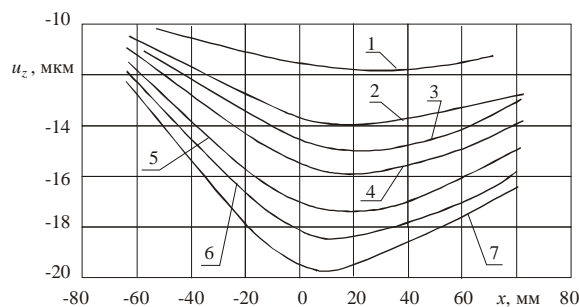


Рис.27. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности матрицы вдоль оси  $x$  (голограмма № 14 в табл. 3)

свидетельствует о необходимости рассмотрения ПФ как сложной механической системы контактирующих друг с другом элементов. На картине интерференционных полос отсутствуют зоны резких градиентов, что позволяет создавать КЭМ элементов пресс-формы без зон резких изменений размеров конечных элементов.

**Заключение.** Анализ результатов свидетельствует о качественном соответствии результатов численных исследований данным, полученным в ходе экспериментальных исследований. При этом погрешность по перемещениям не превышает 10-15% для различных вариантов сочетания параметров. Это позволяет заключить, что разработанный программно-модельный комплекс автоматизированного анализа и синтеза расчетных моделей и элементов конструкций пресс-форм является эффективным инструментом, позволяющим оперативно и с высокой степенью достоверности решать комплекс задач, возникающих при проектировании и исследовании ПФ.

Данный программно-модельный комплекс впитал в себя результаты огромного числа численных и экспериментальных исследований и отражает важнейшие направления развития методов решения связанных нелинейных задач: строгая математическая постановка и привлечение современных тео-

рий и численных методов; возможность комплексного моделирования связанных процессов и состояний с высокой точностью и разработки обоснованных рекомендаций по выбору конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик проектируемых литейных форм; учет специфики проектируемых изделий; возможность накопления баз знаний; обеспечение работоспособности и точности изготовления изделий; сквозная параметризация и возможность экспорта/импорта в/из различные системы автоматизированного проектирования.

В дальнейшем планируется проведение разработок по расширению возможностей созданного программно-модельного комплекса и спектра решаемых задач.

**Список литературы.** 1. Храпцова И.Я., Ткачук А.Н., Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Орлов Е.А., Чепурной А.Д. Специализированная система анализа и синтеза и расчетно-экспериментальное исследование элементов пресс-форм // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиностроительство та САПР”. – 2005. – № 60. – С.151-178. 2. Демина Н.А., Назарова О.П., Ткачук А.Н. Контактное взаимодействие в сопряжении „пуансон – матрица – заготовка” // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиностроительство та САПР”. – 2007. – № 23. – С.39-48. 3. Ткачук А.Н. Исследования термоупругих контактных задач элементов пресс-форм для литья под давлением с учетом фазовых превращений в отливке // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2008. – Вып. 2. – С.144-158. 4. Ткачук А.Н. Численное решение тестовых термоупругих контактных задач для элементов пресс-форм // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2008. – Вып. 9. – С.118-124. 5. Ткачук Н.А., Грищенко Г.Д., Ткачук А.Н., А.В. Бондаренко, Бруль С.Т. Расчетно-экспериментальное обоснование параметров численных моделей элементов механических систем // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2008. – Вып. 14. – С.117-125. 6. Ткачук Н.А., Мовшиович А.Я., Ткачук А.Н. Технологические системы холоднолистовой штамповки: к вопросу обоснования расчетных схем элементов разделительных штампов // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: „Машиноведение и САПР”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2008. – Вып. 14. – С.126-140. 7. Сеа Ж. Оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1973. – 244 с. 8. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления. – М.: Наука, 1973. – 240 с. 9. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикл. мат. и мех. – 1977. –Т.41.– Вып.2. – С.329-337. 10. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров – // Доклады АН СССР, 1976. – Т.230. –№ 2.– С.308-310. 11. Кравчук А.С., Васильев В.А. Численные методы решения контактных задач для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикладная механика. – 1980. –Т.16.– Вып.6. – С.9-15. 12. Кравчук А.С., Васильев В.А. Вариационный метод в контактной задаче теории упругости / В кн. Упругость и неупругость. – М.: Наука, 1978. – С.23-31. 13. Кравчук А.С. Постановка задачи о контакте нескольких деформируемых тел как задачи нелинейного программирования // Прикл. мат. и мех. – 1978. – Т.42. – Вып.3. – С.466-474. 14. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1980. – 536 с. 15.Кравчук А.С., Сурськов В.А. Численное решение геометрически нелинейных контактных задач // Доклады АН СССР, 1981. – Т.259. – № 6.– С.1327-1329. 16. Гловачек И, Ганслингер Я, Нечас И., Ловишек Я. Решение вариационных неравенств в механике. – М.: Мир, 1986. – 270 с. 17. Дюво Г., Лионс Ж.Л. Неравенства в механике и физике. – М.: Наука, 1980. – 384 с. 18. Лионс Ж.Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 587 с. 19. Belytschko T., Neal M.O. Contact-Impact by the Pinball Algorithm with Penalty and Lagrangian Methods // Int. J. for Numerical Methods in Engineering, (1991), 31. P.547-572. 20. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с. 21. Отчет о комплексных исследованиях прочности и жесткости базовых плит УПТО-Р и элементов крупногабаритных пресс-форм // ХФ ЦНИТИ. Тема ТТУ-654-90, этап 5. – Арх. № 0386 от 28.12.90 г. 22. Касатки Б.С., Кудорин Б.А., Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Полухин П.И., Чиченев Н.А. Экспериментальные методы исследования


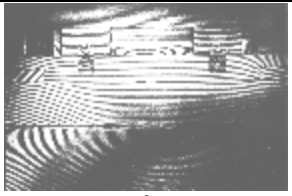
деформаций и напряжений. – К.: Наукова думка. – 1981. – 584 с. **23.** Капустин А.А. Отчет об исследовании жесткости и прочности блоков переналаживаемых пресс-форм и рабочего инструмента штампов методами голографической и спекл-интерферометрии. // ХФ ЦНИТИ. Тема №38-01-90. Арх. № 0387 от 30.11.90 г. **24.** Капустин А.А. Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натурных конструкций. / В кн.: Физические основы голографии. – Л.: ЛИЯФ, 1979. – С.137-159. **25.** Капустин А.А. Методы, использующие голографическую интерферометрию для спекл-интерферометрических измерений / В кн.: Методические указания /Применение спекл-интерферометрии для контроля качества промышленных изделий. – Горький: ГФ. ВНИИМАШ, 1980. – С.45-53.

Поступила в редколлегию 12.03.09

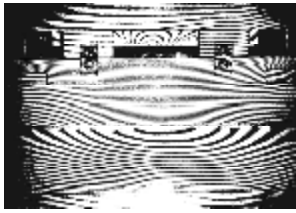


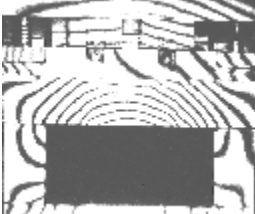
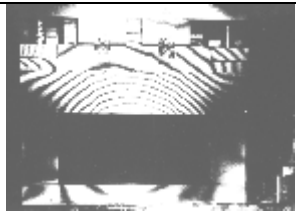
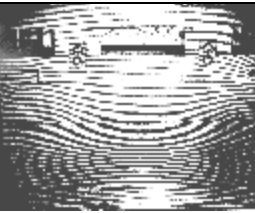
Варианты сочетания конструктивных и эксплуатационных параметров (\* для матрицы)

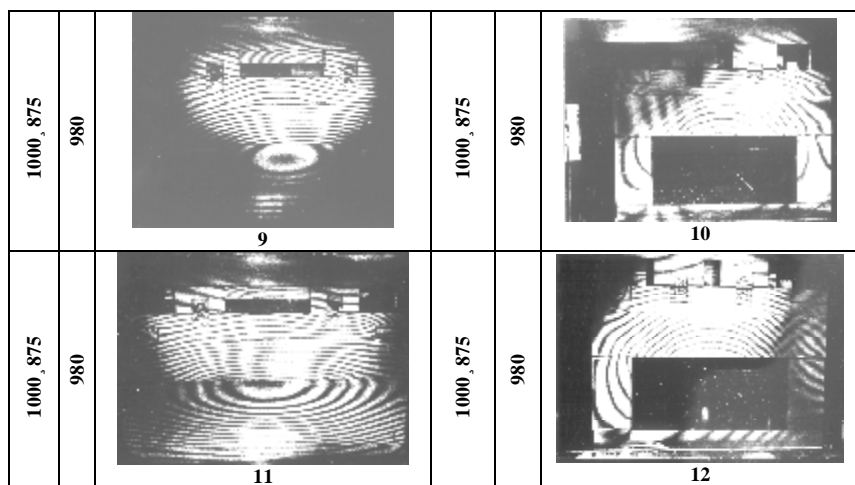
№ голограммы	Плоскость записи	Изменения в конструкции	Перепад нагрузки, кН	Внутр. давление, МПа
1	Oy	винты затянуты, опоры отсутствуют	250 ÷ 330	2,45
2	Oy	винты касаются, опоры отсутствуют	250 ÷ 330	2,45
3	Oy	винты не касаются, опоры отсутствуют	250 ÷ 330	2,45
4	Ox	винты не касаются, опоры отсутствуют	250 ÷ 330	2,45
5	Oy	винты затянуты, установлены две опоры 62,29мм	1000 ÷ 875	9,80
6	Ox	винты затянуты, установлены две опоры 62,29мм	1000 ÷ 875	9,80
7	Ox	опоры отсутствуют, винты затянуты	1000 ÷ 875	9,80
8	Oy	винты затянуты, опоры отсутствуют	1000 ÷ 875	9,80
9	Oy	винты затянуты, установлены две опоры 62,34 мм	1000 ÷ 875	9,80
10	Ox	винты затянуты, установлены две опоры 62,39 мм	1000 ÷ 875	9,80
11	Oy	винты затянуты, установлены две опоры 62,39 мм	1000 ÷ 875	9,80
12	Ox	винты затянуты, установлены две опоры 62,39 мм	1000 ÷ 875	9,80
13*	Oy		50 ÷ 20	0
14*	Ox		50 ÷ 20	0

Голографические интерферограммы матриц, характеризующие деформационные изменения при перепаде нагрузки гидравлического пресса (№ голограммы в табл.3)

Перепад нагрузки	P <sub>вн.</sub> , МПа	Интерферограмма	Перепад нагрузки	P <sub>вн.</sub> , МПа	Интерферограмма
1	2	3	4	5	6
250, 330	245		250, 330	245	
		1			2

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6
250, 330	245		250, 330	245	
		3			4
1000, 875	980		1000, 875	980	
		5			6
1000, 875	980		1000, 875	980	
		7			8



Продолжение табл. 4

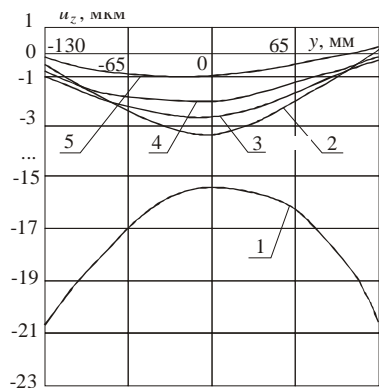
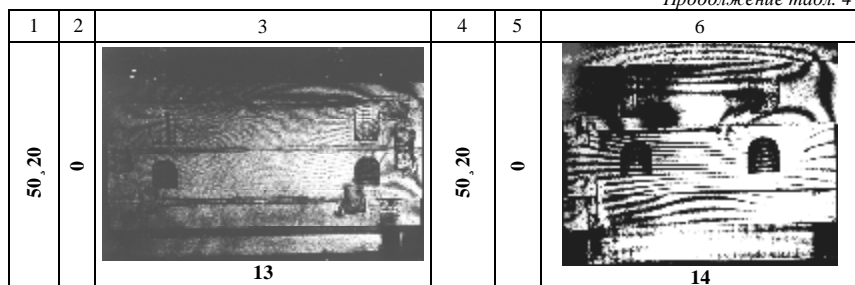


Рис.14. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 1 в табл.3)

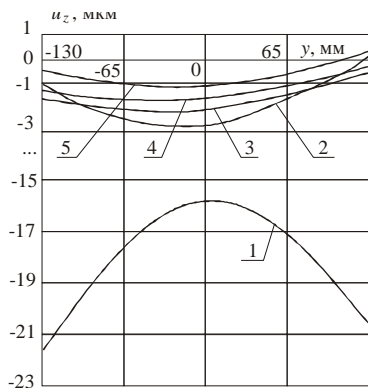


Рис.15. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 2 в табл. 3)

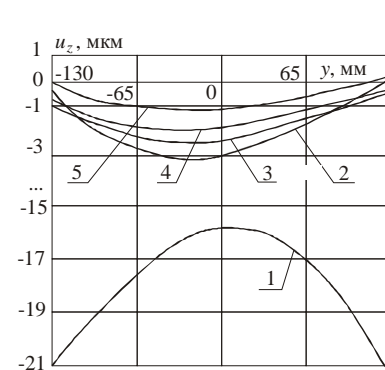


Рис.16. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 3 в табл.3)

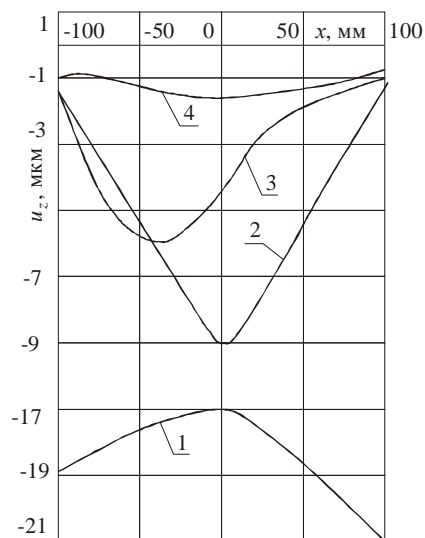


Рис.18. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $x$  (голограмма № 6 в табл.3)

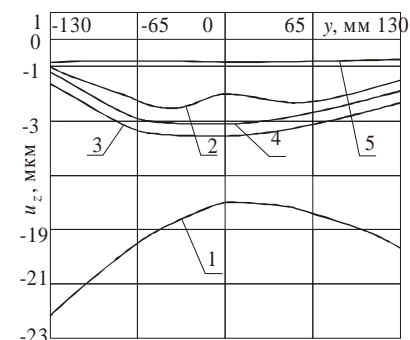


Рис.17. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 5 в табл.3)

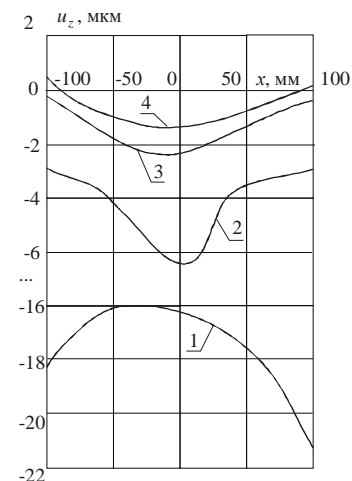


Рис.19. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 4 в табл.3)

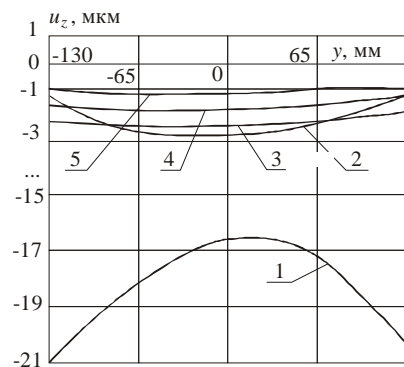


Рис. 21. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 8 в табл.3)

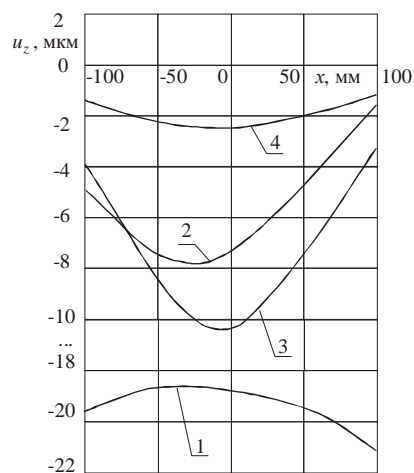


Рис.20. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности матрицы вдоль оси  $x$  (голограмма № 7 в табл.3)

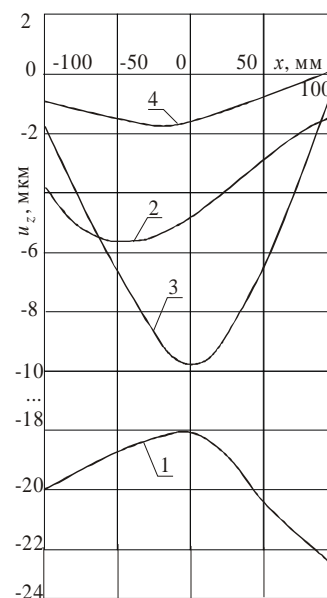


Рис.22. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $x$  (голограмма № 12 в табл.2)

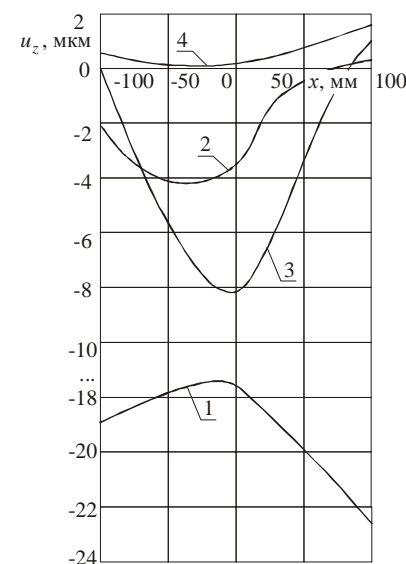


Рис.23. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $x$  (голограмма № 10 в табл. 3)

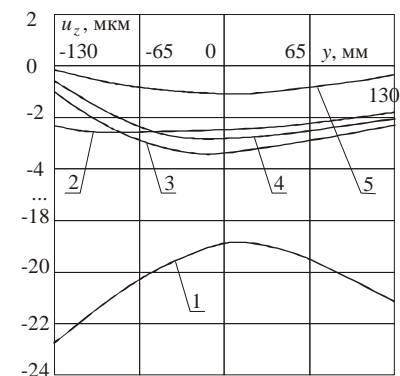


Рис.24. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 11 в табл. 3)

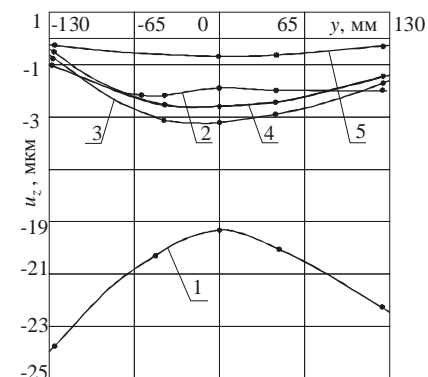


Рис.25. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности блока пресс-формы вдоль оси  $y$  (голограмма № 9 в табл.3)



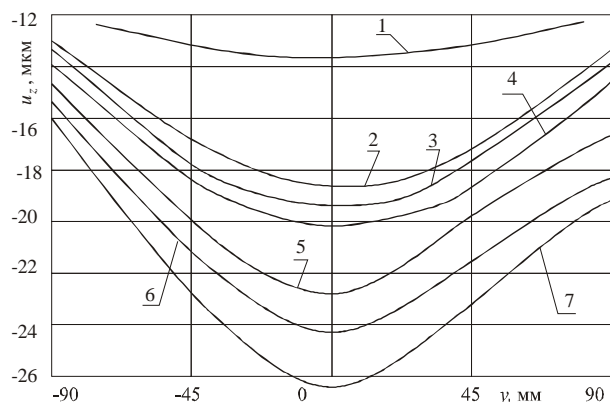


Рис. 26. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности матрицы вдоль оси  $y$  (голограмма № 13 в табл. 3):

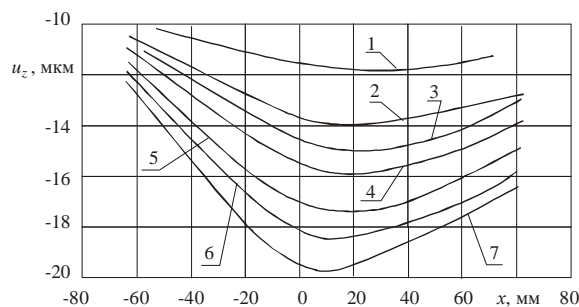


Рис. 27. Распределение перемещений  $u_z$  точек поверхности матрицы вдоль оси  $x$  (голограмма № 14 в табл. 3)

свидетельствует о необходимости рассмотрения ПФ как сложной механической системы контактирующих друг с другом элементов. На картине интерференционных полос отсутствуют зоны резких градиентов, что позволяет создавать КЭМ элементов пресс-формы без зон резких изменений размеров конечных элементов.

**Заключение.** Анализ результатов свидетельствует о качественном соответствии результатов численных исследований данным, полученным в ходе экспериментальных исследований. При этом погрешность по перемещениям не превышает 10-15% для различных вариантов сочетания параметров. Это позволяет заключить, что разработанный программно-модельный комплекс автоматизированного анализа и синтеза расчетных моделей и элементов конструкций пресс-форм является эффективным инструментом, позволяющим оперативно и с высокой степенью достоверности решать комплекс задач, возникающих при проектировании и исследовании ПФ.

Данный программно-модельный комплекс впитал в себя результаты огромного числа численных и экспериментальных исследований и отражает важнейшие направления развития методов решения связанных нелинейных задач: строгая математическая постановка и привлечение современных тео-

рий и численных методов; возможность комплексного моделирования связанных процессов и состояний с высокой точностью и разработки обоснованных рекомендаций по выбору конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик проектируемых литейных форм; учет специфики проектируемых изделий; возможность накопления баз знаний; обеспечение работоспособности и точности изготовления изделий; сквозная параметризация и возможность экспорта/импорта в/из различные системы автоматизированного проектирования.

В дальнейшем планируется проведение разработок по расширению возможностей созданного программно-модельного комплекса и спектра решаемых задач.

**Список литературы.** 1. Храмова И.Я., Ткачук А.Н., Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Орлов Е.А., Чепурной А.Д. Специализированная система анализа и синтеза и расчетно-экспериментальное исследование элементов пресс-форм // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: «Машиностроительство та САПР». – 2005. – № 60. – С.151-178. 2. Демина Н.А., Назарова О.П., Ткачук А.Н. Контактное взаимодействие в сопряжении «пуансон – матрица – заготовка» // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: «Машиностроительство та САПР». – 2007. – № 23. – С.39-48. 3. Ткачук А.Н. Исследования термоупругих контактных задач элементов пресс-форм для литья под давлением с учетом фазовых превращений в отливке // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: «Машиноведение и САПР». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – Вып. 2. – С.144-158. 4. Ткачук А.Н. Численное решение тестовых термоупругих контактных задач для элементов пресс-форм // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: «Машиноведение и САПР». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – Вып. 9. – С.118-124. 5. Ткачук Н.А., Грищенко Г.Д., Ткачук А.Н., А.В. Бондаренко, Бруль С.Т. Расчетно-экспериментальное обоснование параметров численных моделей элементов механических систем // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: «Машиноведение и САПР». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – Вып. 14. – С.117-125. 6. Ткачук Н.А., Мовшиович А.Я., Ткачук А.Н. Технологические системы холоднолистовой штамповки: к вопросу обоснования расчетных схем элементов разделительных штампов // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып.: «Машиноведение и САПР». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – Вып. 14. – С.126-140. 7. Сеа Ж. Оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1973. – 244 с. 8. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления. – М.: Наука, 1973. – 240 с. 9. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикл. мат. и мех. – 1977. – Т.41. – Вып.2. – С.329-337. 10. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Доклады АН СССР, 1976. – Т.230. – № 2. – С.308-310. 11. Кравчук А.С., Васильев В.А. Численные методы решения контактных задач для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикладная механика. – 1980. – Т.16. – Вып.6. – С.9-15. 12. Кравчук А.С., Васильев В.А. Вариационный метод в контактной задаче теории упругости / В кн. Упругость и неупругость. – М.: Наука, 1978. – С.23-31. 13. Кравчук А.С. Постановка задачи о контакте нескольких деформируемых тел как задачи нелинейного программирования // Прикл. мат. и мех. – 1978. – Т.42. – Вып.3. – С.466-474. 14. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1980. – 536 с. 15. Кравчук А.С., Сурськов В.А. Численное решение геометрически нелинейных контактных задач // Доклады АН СССР, 1981. – Т.259. – № 6. – С.1327-1329. 16. Гловачек И, Ганслингер Я, Нечас И, Ловишек Я. Решение вариационных неравенств в механике. – М.: Мир, 1986. – 270 с. 17. Дюво Г., Лионс Ж.Л. Неравенства в механике и физике. – М.: Наука, 1980. – 384 с. 18. Лионс Ж.Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 587 с. 19. Belytschko T., Neal M.O. Contact-Impact by the Pinball Algorithm with Penalty and Lagrangian Methods // Int. J. for Numerical Methods in Engineering, (1991), 31. P.547-572. 20. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с. 21. Отчет о комплексных исследованиях прочности и жесткости базовых плит УПТО-Р и элементов крупногабаритных пресс-форм // ХФ ЦНИТИ. Тема ТТУ-654-90, этап 5. – Арх. № 0386 от 28.12.90 г. 22. Касатки Б.С., Кудорин Б.А., Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Полухин П.И., Чиченев Н.А. Экспериментальные методы исследования

деформаций и напряжений. – К.: Наукова думка. – 1981. – 584 с. **23. Капустин А.А.** Отчет об исследовании жесткости и прочности блоков переналаживаемых пресс-форм и рабочего инструмента штампов методами голографической и спекл-интерферометрии. // ХФ ЦНИТИ. Тема №38-01-90. Арх. № 0387 от 30.11.90 г. **24. Капустин А.А.** Теория спекл-интерферометрических измерений напряженно-деформированного состояния элементов натурных конструкций. / В кн.: Физические основы голографии. – Л.: ЛИЯФ, 1979. – С.137-159. **25. Капустин А.А.** Методы, использующие голографическую интерферометрию для спекл-интерферометрических измерений / В кн.: Методические указания /Применение спекл-интерферометрии для контроля качества промышленных изделий. – Горький: ГФ. ВНИИМАШ, 1980. – С.45-53.

Поступила в редколлегию 12.03.09

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>О.Д. БОЙКО</b> Аналіз запатентованих конструктивних рішень колісного рушія щодо зменшення впливу його пошкодження на динаміку руху.....	3
<b>О.В. БОНДАРЕНКО, О.В. УСТИНЕНКО</b> Критерії та шляхи оптимізації тривальних коробок передач.....	14
<b>О. В. ВЕРЕТЕЛЬНИК</b> Исследование различных конструкций ортезов при ортезировании шейного отдела позвоночника .....	18
<b>Ю.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, Н.А. ТКАЧУК, Г.Д. ГРИЦЕНКО</b> Расчетно-экспериментальный синтез конечно-элементных моделей тел с регулярной системой вырезов.....	24
<b>В.И. ГОЛОВЧЕНКО, В.А. ШКОДА, Л.Е. ПОЛЕТУН, Т.В. ПОЛИЩУК</b> Расчеты механизмов наклона дуговых сталеплавильных печей.....	50
<b>А.В. ГРАБОВСКИЙ</b> Методы исследования динамики инерционных виброташин и определение действующих нагрузок в виброударной системе.....	61
<b>В.Б. ЗЕЛЕНСКИЙ, А.А. ЗАРУБИНА, И.Я. ХРАМЦОВА, З.С. САФОНОВА</b> Математическая модель ходьбы с протезом на фазе переноса .....	80
<b>О.І. ЗИНЧЕНКО</b> Кінематичний аналіз механізму високого класу з використанням бібліотеки підпрограм аналізу груп другого класу.....	87
<b>С.Н. КАВЕЦКИЙ, Т.В. ГЕРЕШ</b> Синтез планетарного механизма 2А – АА с учетом углов зацепления для радиального дальнего расположением сателлитов.....	91
<b>Вісс. Гр. КЛИМЕНКО</b> Бульові алгебри на базі неперервних і неперервно-диференційовних функцій.....	95
<b>Вісс. Гр. КЛИМЕНКО</b> Змішана багатокритеріальна задача мінімізації по максимуму.....	99
<b>А.В. МАРТЫНЕНКО</b> К вопросу о численном моделировании и экспериментальных исследованиях элементов гидрообъемных передач.....	112
<b>Г.А. ПРИЙМАКОВ</b> Экспериментальное исследование динамики металлополимерного гибкого колеса герметичной силовой волновой зубчатой передачи.....	119
<b>Р.В. ПРОТАСОВ, А.В. УСТИНЕНКО</b> Аналитическое описание поверхностей зубьев эволютных передач.....	125
<b>Н.А. ТКАЧУК, А.Н. ТКАЧУК, В.А. ЗАБОЛОТСКИХ, А.А. КАПУСТИН</b> Методы, алгоритмы и модели для исследования физико-механических процессов при изготовлении деталей литьем....	129